

复合土壤下埋地掺氢天然气管道泄漏扩散规律影响研究

郎逸雪, 周明兵, 喻诗妍

重庆科技大学, 安全科学与工程学院, 重庆

收稿日期: 2025年9月11日; 录用日期: 2025年10月16日; 发布日期: 2025年10月30日

摘要

为研究掺氢天然气管道在砂壤土复合条件下的泄漏扩散规律, 基于流体力学及多孔介质理论, 采用Fluent计算流体动力学软件建立复合土壤下掺氢天然气管道泄漏扩散的三维数值仿真模型, 分析掺氢天然气在不同影响因素下的泄漏扩散规律。结果表明: 土壤分层结构对气体扩散行为具有显著影响(砂土 > 上层壤土 - 下层砂土 > 上层砂土 - 下层壤土 > 壤土), 单一壤土中甲烷扩散到模型边界的时间是上层壤土 - 下层砂土结构的1.56倍, 是上层砂土 - 下层壤土结构的1.4倍, 更是单一砂土结构的2.8倍。并且土壤的分层结构会对气体扩散的路径造成影响, 气体泄漏量随孔径增大而增加, 其浓度分布则因砂土与壤土的孔隙结构差异而不同, 复合土壤“葫芦状”分布的气体扩散云图与单一土壤层中椭圆形扩散云图形成鲜明对比。管道压力升高会增强气体横向扩散能力; 掺氢比增加虽对甲烷扩散影响有限, 但会显著缩短氢气扩散到模型边界的时间。该研究为掺氢天然气管道安全设计和泄漏防控提供了重要的理论参考。

关键词

掺氢天然气, 管道, 泄漏, 复合土壤

Study on the Influence of Leakage and Diffusion of Underground Hydrogen-Blended Natural Gas Pipelines in Composite Soils

Yixue Lang, Mingbing Zhou, Shiyen Yu

School of Safety Science and Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: September 11, 2025; accepted: October 16, 2025; published: October 30, 2025

Abstract

To investigate the leakage and diffusion behavior of hydrogen-blended natural gas pipelines in sandy soil composite conditions, a three-dimensional numerical simulation model of the leakage and diffusion of hydrogen-blended natural gas pipelines in composite soils was established using Fluent computational fluid dynamics software based on fluid mechanics and porous media theory. The leakage and diffusion behavior of hydrogen-blended natural gas under different influencing factors was analyzed. The results showed that soil stratification significantly influenced gas diffusion behavior (sand > upper loam-lower sand > upper sand-lower loam > loam). The time it took for methane to diffuse to the model boundary in loam alone was 1.56 times that in an upper loam-lower sand structure, 1.4 times that in an upper sand-lower loam structure, and 2.8 times that in a sand alone structure. Furthermore, the layered structure of soil affects the path of gas diffusion. Gas leakage increases with increasing pore diameter, while its concentration distribution varies due to the differences in pore structure between sand and loam. The “gourd-shaped” gas diffusion pattern of composite soils contrasts sharply with the elliptical diffusion pattern of single soil layers. Increased pipeline pressure enhances the lateral diffusion capacity of gas. While increasing the hydrogen blending ratio has a limited effect on methane diffusion, it significantly shortens the time it takes for hydrogen to diffuse to the model boundary. This study provides important theoretical reference for the safe design and leakage prevention of hydrogen-blended natural gas pipelines.

Keywords

Hydrogen-Blended Natural Gas, Pipeline, Leakage, Composite Soil

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着“双碳”战略的深入实施，全球能源结构正加速向清洁化、低碳化转型，社会对清洁能源的需求呈现指数级增长态势[1]-[3]。在众多清洁能源中，氢能因其零碳排放、高能量密度及可持续性等优势，被视为能源体系深度脱碳的关键载体，并已成为各国政府、产业界及学术界重点布局的战略方向[4] [5]。在此背景下，深圳和朝阳两地的中低压城镇燃气掺氢示范项目应运而生，旨在通过天然气掺氢技术优化能源结构、提升终端用能效率，并推动氢能产业链的规模化发展[6]。绝大多数天然气管道在长距离输送时均采用埋地敷设方式，这使得土壤介质的物理性质成为影响泄漏气体扩散行为的关键因素。实际管道沿线穿越的并非单一均质土壤，而是由不同物理特性的土壤层组成的复合地层结构。与传统天然气管道相比，氢气的爆炸下限更低，掺氢天然气管道在运行过程中面临更高的安全风险。氢气的理化特性使其泄漏后更易在土壤介质中形成高浓度积聚，增加燃爆事故概率。因此，深入研究复合土壤环境中埋地掺氢天然气管道的泄漏扩散规律，对构建泄漏风险评估模型、优化管道安全设计及制定应急响应策略具有重要的理论价值与工程意义。

近年来，国内外学者对埋地天然气管道泄漏做了大量的研究，胡玮鹏[7]基于 Fluent 构建三维埋地纯氢/掺氢管道泄漏模型，表明氢气在土壤中扩散缓慢且易在泄漏口附近积聚，泄漏风险随孔径、长宽比、掺氢比及土壤孔隙率的增大而升高，浅埋管道的泄漏量及危险性显著增加。彭善碧等[8]分析了掺氢比例、

泄漏孔径、管道压力、埋深和土壤类型对泄漏量和气体扩散的影响,表明土壤类型影响泄漏扩散。詹文文[9]基于 Fluent 数值模拟方法,从扩散云图、监测点浓度动态变化及垂直方向危害距离三个维度,系统分析埋地输气管道泄漏扩散全过程。罗宗林[10]采用 Fluent 软件模拟了天然气在土壤与大气中的扩散过程,分析了泄漏时间、管道压力和土壤类型对天然气质量分数分布的影响。表明泄漏孔水平方向两侧天然气质量分数大致对称分布;土壤中爆炸下限半径随泄漏时间先增大后趋于稳定;泄漏质量流量先快速上升后小幅波动。刘刚[11]等研究发现土壤性质是影响掺氢天然气泄漏扩散的主要因素,尤其在砂土中,甲烷和氢气的扩散规律及危险区域需重点关注。常欢[12]等对比粉质砂土、黏土、壤土三种不同土质中天然气速度、浓度的扩散规律,揭示了土壤性质对气体扩散速率的影响。Liu X [13]建立了埋地混氢管道泄漏和扩散的综合模型,并耦合了管道流-分层-扩散模型,分析了氢气混合比、土壤渗透性和风速对泄漏特性的影响。Bu F [14]通过数值模拟分析了注氢前后及不同混氢比下的气体泄漏扩散特性,研究发现,混氢天然气泄漏后在土壤中扩散范围更广,压力和速度值更高。Su Y [15]通过数值模拟探讨了城市埋地富氢天然气管道的泄漏和扩散特性,研究发现,掺氢比并非增加泄漏风险的关键因素,不同掺氢比下的首次危险时间有所差异。Zhang [16]等通过 CFD 对不同工况下的针孔泄漏进行数值模拟,重点探究了压力、土壤种类、针孔直径、针孔位置对泄漏扩散的影响。

通过国内外相关研究进展可见,土壤物理性质对掺氢天然气管道泄漏扩散规律具有显著影响。根据唐江[17]的研究表明,土壤在空间分布上确实具有显著的区域性特征,存在上层为砂土层,下层为质地较细的壤土层的空间结构。目前,关于常规埋地天然气管道泄漏扩散的研究通常仅考虑单一土壤介质,这与实际工程中复杂的土壤条件存在较大差异。因此,本研究基于 Fluent 计算流体动力学软件,构建了上层砂土下层壤土条件下掺氢天然气管道泄漏扩散的三维数字仿真模型,深入分析了不同工况下的气体泄漏扩散规律,为埋地掺氢天然气管道的安全输送提供了理论依据。

2. 数值方法

2.1. 物理模型

调研发现,输气管道直径在 $\text{DN}100\text{ mm} \leq d \leq \text{DN}254\text{ mm}$ 范围内时,事故发生率较高[18]。参考国内玉门油田首条中长距离输氢管道示范项目所采用的 200 mm 管径[19],本研究选取 DN200 mm,长度为 4 m 的掺氢天然气管道,管道沿水平方向敷设,建立 $4\text{ m} \times 4\text{ m} \times 3\text{ m}$ 的埋地管道泄漏扩散三维物理模型,泄漏孔位于管顶中心位置,模型示意图如下图 1 所示。

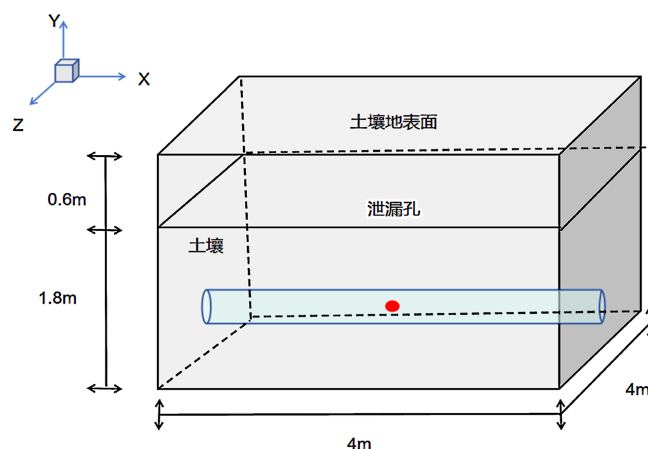


Figure 1. Model schematic
图 1. 几何模型示意图

重点探究土壤孔隙率、掺氢比、管道压力、泄漏孔直径四个影响因素对埋地含硫天然气泄漏扩散规律与危害范围影响,具体工况设置如表 1 所示。土壤域设定为多孔介质区域,将孔隙率、粘性阻力系数与惯性阻力系数引入其中[20]-[22],土壤参数如表 2 所示。

Table 1. Simulated leakage and diffusion conditions for buried hydrogen-blended natural gas pipelines

表 1. 埋地掺氢天然气管道泄漏扩散模拟工况

参数	具体数值
土壤孔隙率	0.25, 0.43
掺氢比(%)	5, 15, 30
管道压力(MPa)	0.4, 1.2, 2
泄漏孔直径(mm)	10, 30, 50

Table 2. Soil physical parameters

表 2. 土壤物性参数

土壤类型	平均粒径/mm	孔隙率	粘性阻力系数(1/α)/m ⁻²	惯性阻力系数(C ₂)/m ⁻¹
砂土	0.5	0.25	2.16e+10	3.36e+05
壤土	0.05	0.43	2.45e+11	5.02e+05

2.2. 数学模型

埋地掺氢天然气管道的泄漏与扩散过程可通过流体力学基本控制方程进行描述,包括连续性方程、动量守恒方程、能量守恒方程以及组分输运方程。

(1) 连续性守恒方程

在流体力学中,连续性方程可由质量守恒定律推导得出[23],其具体表述为式(1.1):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1.1)$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m³; t 为时间, s; x 为位移, m; u 为速度, m/s。

(2) 动量守恒方程

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (1.2)$$

式中: p 为绝对压力, Pa; τ_{ij} 为应力张量, Pa; g 为加速度, m/s²; F_i 为外部体积力, N/m³。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[u_i (\rho_f E_f + P) \right] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right] \quad (1.3)$$

$$k_{eff} = \gamma k_f + (1 - \gamma) k_s \quad (1.4)$$

(3) 能量守恒方程

式中, E 为控制体的总能量, J; k 为有效传热系数, W·m⁻¹·K⁻¹; T 为温度, K; γ 为孔隙率, 下标 i, j, l 为方向, f 为流体通过多孔介质, s 为多孔介质固体材料, eff 为有效性。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon \rho \omega_i) + \nabla \cdot (\rho \omega_i v) = \nabla \cdot (\rho D \nabla \omega_i) + S_i \quad (1.5)$$

(4) 物质运输方程

式中： ω_i 为组分的*i*体积分数； v 为扩散速度，m/s； D 为扩散系数； S_i 为组分*i*的速率，m/s。

2.3. 边界条件与求解

模型设置的边界条件如表 3 所示。为准确表征土壤介质的复杂特性，本研究将土壤域建模为多孔介质区域，采用 DES 湍流模型[24] [25]，引入了孔隙率、粘性阻力系数和惯性阻力系数等关键参数，以精确描述气体在多孔介质中的渗流扩散特性。采用具有二阶精度的迎风离散格式进行空间离散，选用具有强瞬态适应性的 PISO 算法作为压力 - 速度耦合求解策略[11]。考虑到多孔土壤介质中气体扩散过程伴随显著的压力梯度变化，采用 PRESTO!格式进行压力场插值处理，以有效保证压力场的计算精度。

Table 3. Boundary setting table
表 3. 边界设置表

边界名称	边界条件	参数设定
泄漏孔	Pressure-Inlet	设置湍流粘度、掺氢比
土壤出口	Pressure-Outlet	管道压力
土壤四周	Symmetry	保持默认
土壤底部	Symmetry	保持默认
管道壁面	Wall	保持默认

2.4. 网格无关性验证

掺氢埋地管道土壤泄漏扩散模型采用非结构化网格进行离散，为保证模拟结果的可靠性，进行了网格无关性验证，对比 46 万、87 万、100 万三种不同网格数量下监测点(0,2.2,0)甲烷浓度随时间变化曲线图。图 2 结果表明三种网格当网格数量到 87 万时，甲烷浓度变化趋势一致，其中 83 万与 100 万网格的计算曲线基本重合，平均相对误差仅为 1.4%。综合考虑计算精度与效率，采用 100 万网格进行数值模拟。

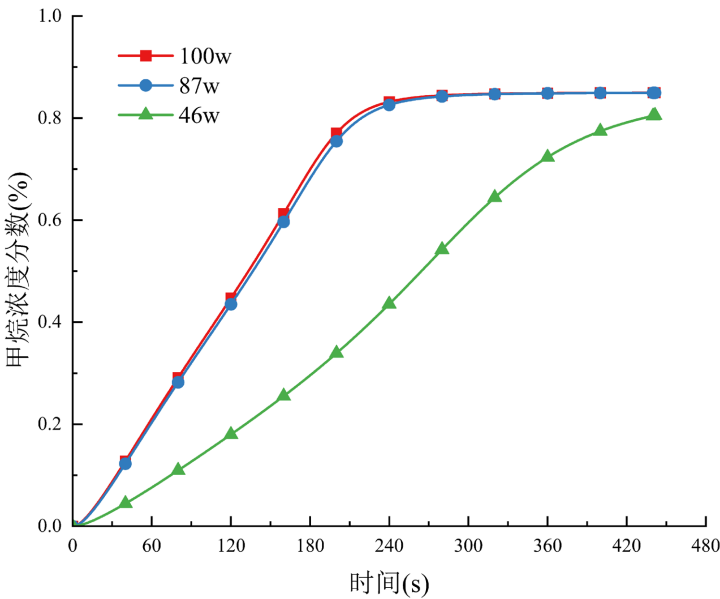


Figure 2. Grid independence verification
图 2. 网格无关性验证

3. 影响因素分析

我国现有掺氢输氢管道常需穿越砂土、壤土等组成的复合土壤层,这种非均质土壤介质对气体扩散过程具有重要影响。与单一土壤相比,复合土壤因其孔隙率、渗透率等参数的差异,泄漏气体的迁移规律也会随之改变。在掺氢天然气管道输送过程中,一旦发生气体泄漏,可燃气体将逐渐在周围环境中扩散积聚。当气体浓度达到其爆炸极限范围时,极易引发爆炸事故。以掺氢天然气管道为例,其主要成分甲烷和氢气均属于易燃易爆气体,其中甲烷的爆炸下限(LEL)为 5% (体积分数),氢气则更低,仅为 4% [26]。为评估泄漏事故的危险范围,本研究通过建立数学模型,分别计算甲烷和氢气在砂土、壤土的复合土壤中横向扩散距离,以此确定不同组分气体泄漏后的危险区域范围。

3.1. 土壤性质对掺氢天然气管道泄漏扩散的影响

图 3 展示了不同土壤层分布下的甲烷浓度云图,土壤层的分布不同,气体的扩散路径不同。复合土壤中“葫芦状”非对称扩散云图,与现有文献在均质土壤条件下的规则椭圆形[11]形成明显对比。这一差异揭示了传统均质模型在描述分层地质中气体迁移规律时存在局限:上层砂土的高渗透性促使气体优先横向扩展,而下层壤土则限制了气体的垂向迁移,导致气体在界面处发生汇集和二次扩散,从而形成独特的“葫芦状”结构。图 4 进一步对比了不同土壤层分布对甲烷和氢气爆炸下限垂直扩散距离的影响。结果表明,不同土壤结构对气体扩散时间具有延缓作用,其中单一砂土结构的渗透性最高,甲烷和氢气分别仅需 25 s 和 70 s 即可扩散至地表;在上层壤土-下层砂土的层状结构中,甲烷和氢气的扩散时间延长至 45 s 和 80 s;而在上层砂土-下层壤土结构中,气体扩散进一步减缓,甲烷和氢气分别需要 50 s 和 150 s 到达地表,这种差异可能与上层低渗透性土壤的厚度有关。单一壤土结构表现出最强的气体阻滞能力,甲烷和氢气扩散至地表的时间分别达到 70 s 和 240 s。单一壤土中甲烷的扩散时间是上层壤土-下层砂土结构的 1.56 倍,是上层砂土-下层壤土结构的 1.4 倍,更是单一砂土结构的 2.8 倍。基于上述发现,建议在管道填埋工程中优先采用上层为低渗透性壤土或黏土的覆土结构,以显著延缓气体的扩散速率,从而有效提升管道系统的整体安全性。

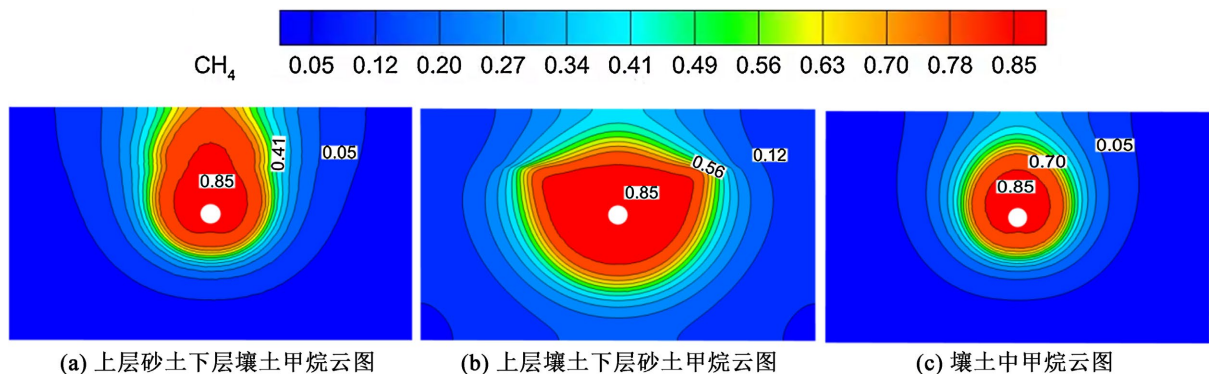


Figure 3. Methane concentration distribution cloud map
图 3. 甲烷浓度分布云图

3.2. 泄漏孔径对掺氢天然气管道泄漏扩散的影响

图 5 展示了 360 s 时不同泄漏孔径下甲烷在土壤中的浓度分布云图。分析可知,孔径对气体泄漏扩散速度具有显著影响,在泄漏 60 s 时,不同孔径条件下的甲烷横向扩散最大距离呈现差异: 5 mm 泄漏孔径下扩散距离为 0.53 m, 10 mm 孔径下增至 0.75 m, 50 mm 孔径下则达到 1.47 m。对比发现,当泄漏孔径

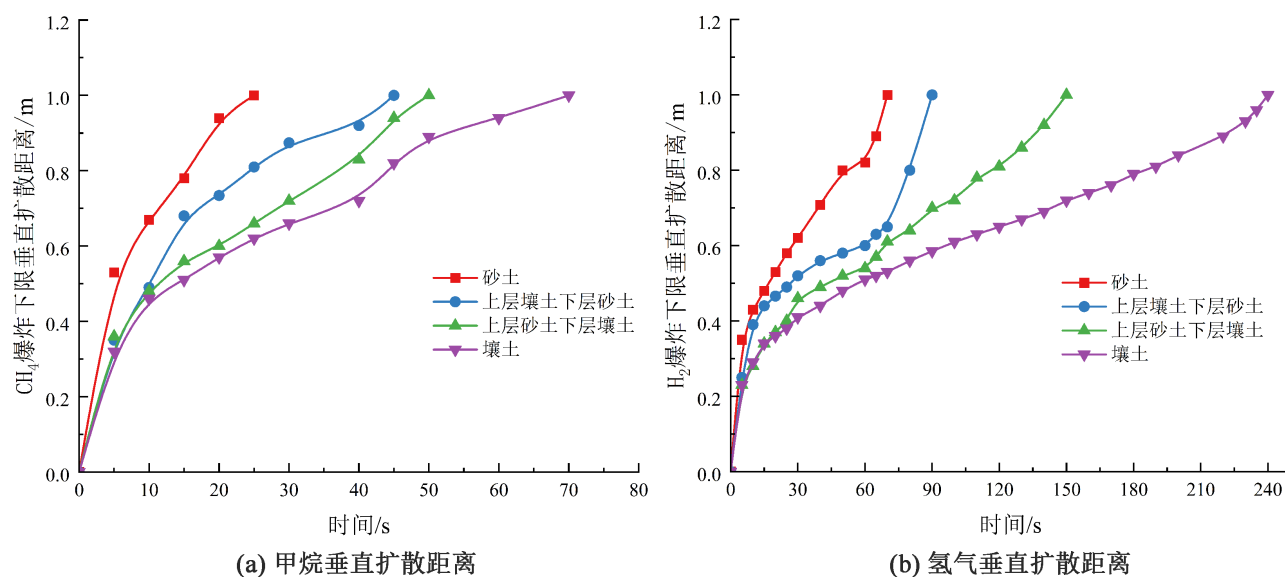


Figure 4. Vertical diffusion distance of methane and hydrogen

图 4. 甲烷和氢气垂直扩散距离

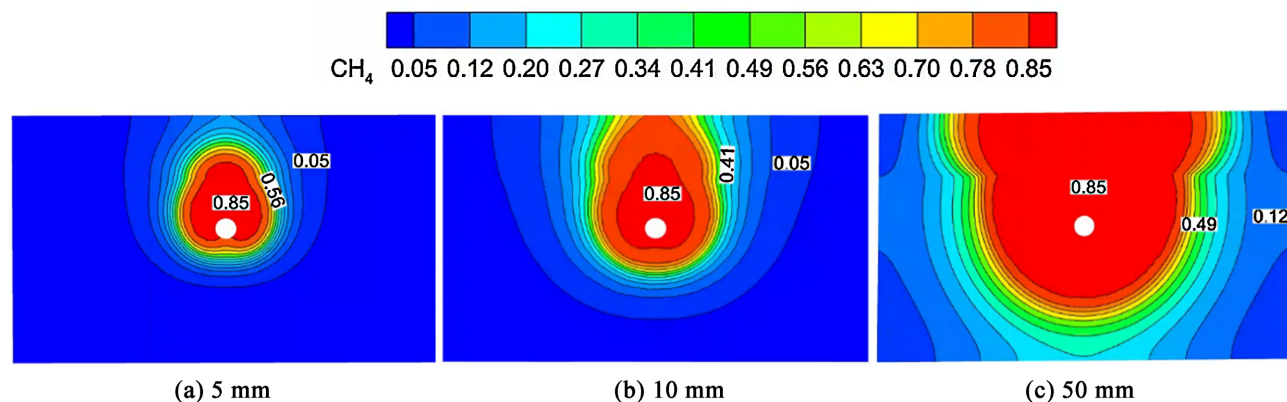


Figure 5. Methane concentration distribution cloud map at different pore sizes

图 5. 不同孔径下甲烷浓度分布云图

从 5 mm 增大至 50 mm 时, 甲烷横向扩散距离增加了约 1.8 倍, 表明泄漏孔径的增大会加剧气体的扩散范围。气体泄漏量随孔径增大而增加, 其浓度分布则因砂土与壤土的孔隙结构差异而不同, 复合土壤“葫芦状”分布的气体扩散云图与单一土壤层中椭圆形扩散云图形成鲜明对比。这表明砂土层的渗透性会显著改变泄漏气体的迁移路径。在实际工程中, 需重点关注泄漏孔径的扩大效应, 以避免因孔径增大导致管道泄漏风险加剧。

3.3. 掺氢比对掺氢天然气管道泄漏扩散的影响

图 6 展示了不同掺氢比条件下, 甲烷与氢气浓度达到爆炸下限时的气体横向扩散半径变化规律。结果表明, 掺氢比对甲烷横向扩散半径的影响较小, 但对氢气扩散半径的影响较为显著。尽管气体泄漏初始发生于壤土层, 但随着掺氢比的提升, 氢气的扩散行为表现出明显差异: 当掺氢比达到 30% 时, 砂土层中的氢气横向扩散半径在 60 s 后即超过壤土层。这一现象表明, 掺氢比的增加会显著促进氢气在砂土层中的扩散速率。

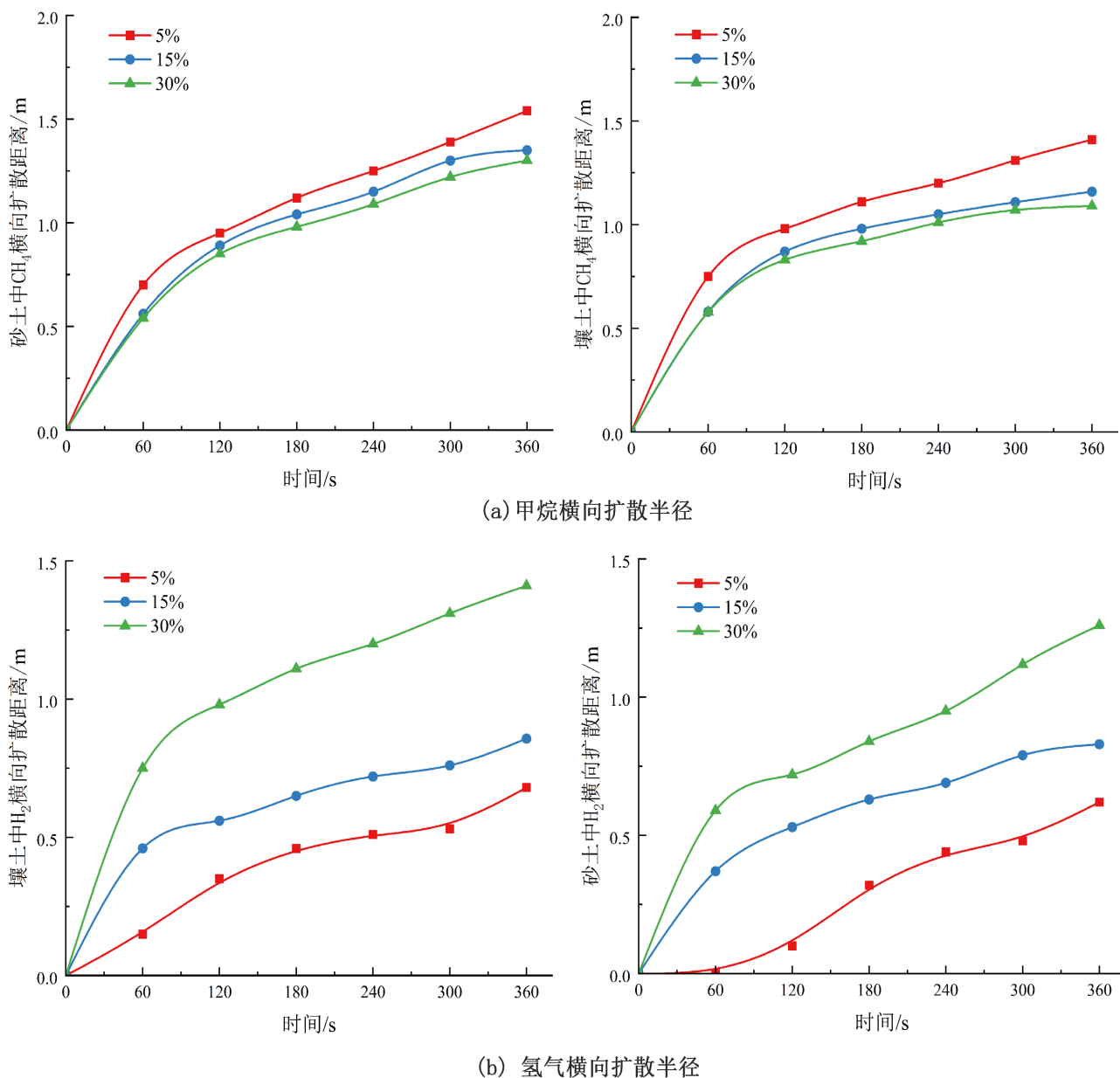


Figure 6. Transverse diffusion radius of methane and hydrogen at different hydrogen doping ratios

图 6. 不同掺氢比下甲烷和氢气横向扩散半径

3.4. 压力对掺氢天然气管道泄漏扩散的影响

管道压力是影响掺氢天然气管道泄漏扩散特性的关键因素。如图 7 所示, 甲烷和氢气的横向扩散半径随压力变化呈现明显差异。在泄漏初期, 气体主要在渗透性较低的壤土层中扩散; 随着时间推移, 气体逐渐向上迁移至渗透性更高的砂土层。在 0.4 MPa 低压条件下, 甲烷纵向扩散距离为 1.06 m, 砂土层与壤土层的横向扩散距离差异较小; 砂土介质具有更大的孔隙率和透气性, 使得气体在其中的横向扩散能力明显优于壤土层, 在 2 MPa 高压工况下, 60 s 时, 甲烷纵向扩散距离为 1.4 m, 砂土层的横向扩散半径达到 0.76 m, 壤土层为 0.72 m, 即泄漏 60 s 时, 砂土层的扩散半径已超过壤土层, 且垂直扩散速度是低压的 1.3 倍, 这种差异随着压力的升高而愈加显著。

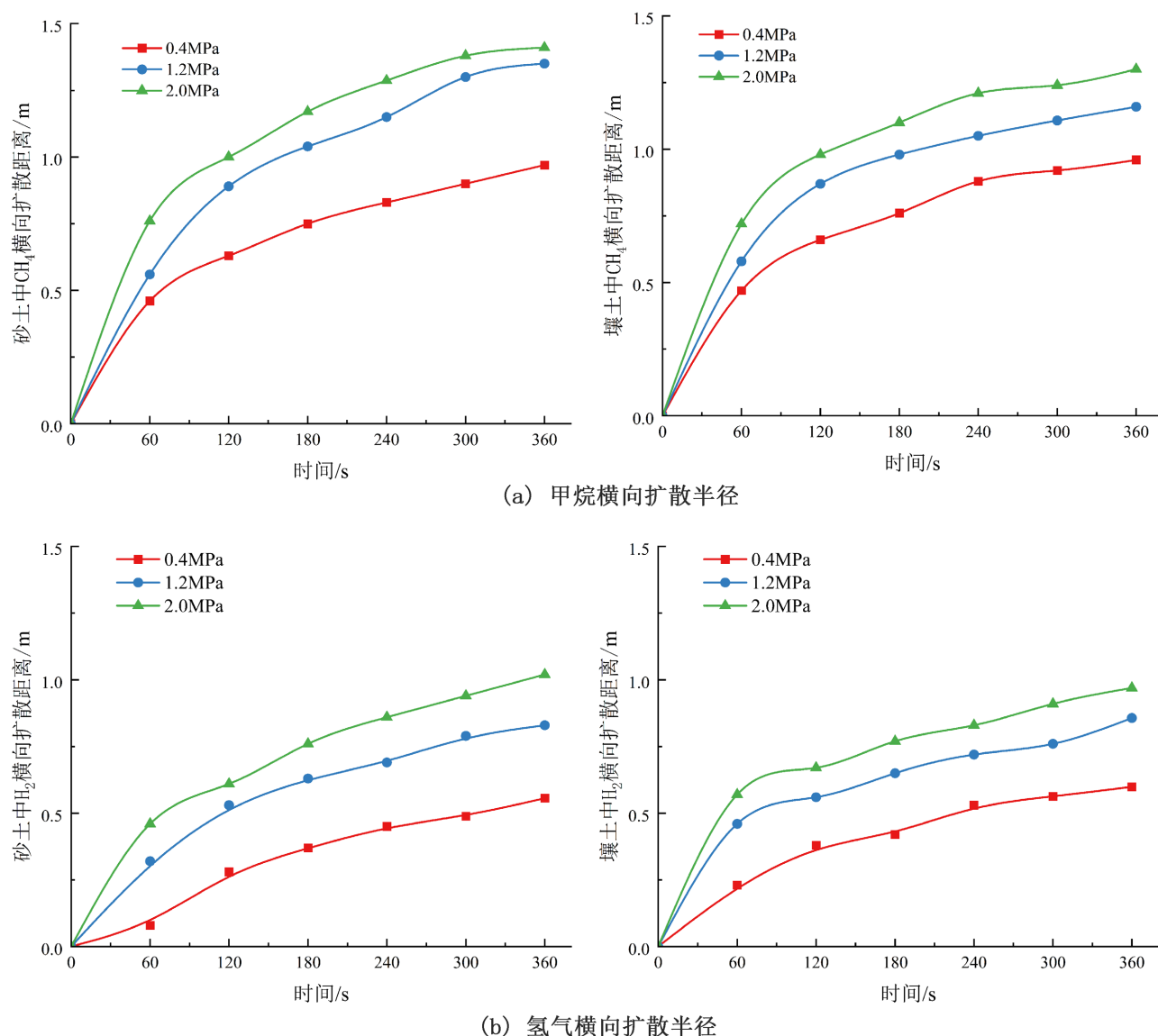


Figure 7. Transverse diffusion radius of methane and hydrogen at different pressures

图 7. 不同压力下甲烷和氢气横向扩散半径

4. 结论

本研究分析掺氢天然气管道在不同土壤分层结构及泄漏工况下的扩散特性, 揭示了土壤渗透性、泄漏孔径、掺氢比、压力对气体扩散行为的影响规律。

1) 针对土壤层的填埋方式, 土壤层分布对甲烷和氢气的扩散行为具有显著影响。根据不同层结构气体扩散至地表时间排序为: 单一砂土 > 上层壤土 - 下层砂土 > 上层砂土 - 下层壤土 > 单一壤土。单一壤土中甲烷扩散时间是上层壤土 - 下层砂土、上层砂土 - 下层壤土和单一砂土的 1.56 倍、1.4 倍和 2.8 倍。基于此, 工程实践中推荐采用上层低渗透性壤土或黏土的覆土结构, 以有效延缓气体扩散, 提升管道安全性。

2) 泄漏孔径对气体扩散范围具有显著影响: 在壤土 - 砂土分层介质中, 甲烷进入砂土层后扩散速率显著提升, 随着孔径的增加, 复合土壤“葫芦状”分布的气体扩散云图与单一土壤层中椭圆形扩散云图

形成鲜明对比。掺氢比对甲烷扩散影响有限,但会显著改变氢气的扩散特性;同时,随着管道压力升高,砂土层因其较高的孔隙率和透气性,表现出更强的气体横向扩散能力。

本研究通过构建复合土壤地质模型,对埋地掺氢天然气管道泄漏后的气体扩散规律进行了深入探讨。与传统均质土壤中的扩散路径相比,本研究明确了复合分层结构对气体运移路径与形态的显著影响,揭示了气体在不同渗透性土层界面处的特殊迁移行为。然而,本研究仍存在一定的局限性,尤其在于仅考虑了干土条件,未引入含水率这一关键变量,未能更全面地反映实际土壤中气-水两相耦合作用对泄漏气体扩散行为的影响。后续研究可在此基础上,进一步考虑土壤湿度变化、非饱和流动过程及多场耦合机制,以更真实地揭示复合地质环境下掺氢天然气的泄漏扩散特性。

基金项目

重庆科技大学研究生创新计划项目(YKJCX2420721)。

参考文献

- [1] 张智,赵苑瑾,蔡楠. 中国氢能产业技术发展现状及未来展望[J]. 天然气工业, 2022, 42(5): 156-165.
- [2] 牟磊,刘海峰,甘燕利,等. 西气东输一线管道掺氢输送压缩机运行工况适应性分析[J]. 石油与天然气化工, 2023, 52(2): 122-141.
- [3] 周军,管恩勇,梁光川,等. 考虑输气功率的掺氢天然气管道运行优化研究[J]. 可再生能源, 2023, 41(5): 569-577.
- [4] 张烘玮,赵杰,李敬法,等. 天然气掺氢输送环境下的腐蚀与氢脆研究进展[J]. 天然气工业, 2023, 43(6): 126-138.
- [5] 陈俊文,汤晓勇,陈情来,等. 天然气掺氢对管输工艺安全影响的探讨[J]. 天然气与石油, 2022, 40(4): 16-22.
- [6] 孔莹莹,崔继彤,韩辉,等. 国内外氢气管道输送技术标准对比与探讨[J]. 油气储运, 2023, 42(8): 944-951.
- [7] 胡玮鹏,陈光,齐宝金,等. 埋地纯氢/掺氢天然气管道泄漏扩散数值模拟[J]. 油气储运, 2023, 42(10): 1118-1127+1136.
- [8] 彭善碧,罗雪. 埋地掺氢天然气管道泄漏扩散数值模拟研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(3): 63-69.
- [9] 詹文文,巨成永,席敏敏,等. 土壤-大气耦合下埋地输气管道泄漏扩散全过程模拟研究[J]. 焊管, 2025, 48(2): 15-23.
- [10] 罗宗林,张甜甜,谭羽非,等. 土壤-大气耦合下直埋燃气管道泄漏扩散模拟[J]. 煤气与热力, 2021, 41(9): 36-42+44.
- [11] 刘刚,王鑫,陈铎,等. 土壤性质对掺氢天然气管道泄漏扩散规律的影响[J]. 石油与天然气化工, 2024, 53(5): 33-45.
- [12] 常欢,谭羽非,王雪梅,等. 城市直埋燃气管道泄漏沿土壤扩散模拟研究[J]. 煤气与热力, 2020, 40(11): 28-34+42-43.
- [13] Liu, X., Wang, Y., Liang, Y. and Li, J. (2024) CFD Analysis of Leakage and Diffusion Characteristics in the Buried Hydrogen-Blended Natural Gas Pipeline. *International Journal of Hydrogen Energy*, **60**, 354-368. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.092>
- [14] Bu, F., He, Y., Lu, Q., Liu, M., Bai, J., Lv, Z., et al. (2024) Analysis of Leakage and Diffusion Characteristics and Hazard Range Determination of Buried Hydrogen-Blended Natural Gas Pipeline Based on CFD. *ACS Omega*, **9**, 39202-39218. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c06414>
- [15] Su, Y., Li, J., Yu, B., Zhao, Y., Han, D. and Sun, D. (2023) Modeling of Hydrogen Blending on the Leakage and Diffusion of Urban Buried Hydrogen-Enriched Natural Gas Pipeline. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, **136**, 1315-1337. <https://doi.org/10.32604/cmes.2023.026035>
- [16] Zhang, W. and Zhao, G. (2024) Leakage and Diffusion Characteristics of Underground Hydrogen Pipeline. *Petroleum*, **10**, 319-325. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2023.06.002>
- [17] 唐江. 重庆市紫色土的系统分类研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2017.
- [18] 冯伟. 人口密集区域输气管道定量风险评价[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
- [19] 环球网. 我国首条纯氢输送管道示范项目已投入运行 探访绿色能源“高速公路” [EB/OL]. 百度百家号, 2023-07-17. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1776279427981945015&wfr=spider&for=pc>, 2024-05-27.

-
- [20] 马梅, 蒋仲安. 隧道内埋地燃气管道泄漏扩散规律研究[J]. 石油与天然气化工, 2022, 51(1): 132-137.
- [21] 邹行, 裴鹏, 郝定溢, 等. 不同土壤类型与含水率对水平埋管换热性能影响数值分析[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(6): 221-229.
- [22] 金龙, 陈樑, 王海燕, 等. 不同土壤对输气管道泄漏扩散影响模拟分析[J]. 石油与天然气化工, 2020, 49(4): 101-108.
- [23] Matsson, J.E. (2023) An Introduction to Ansys Fluent 2023. SDC Publications.
- [24] Shur, M., Spalart, P.R., Strelets, M. and Travin, A. (1999) Detached-Eddy Simulation of an Airfoil at High Angle of Attack. In: Rodi, W. and Laurence, D., Eds., *Engineering Turbulence Modelling and Experiments 4*, Elsevier, 669-678. <https://doi.org/10.1016/b978-008043328-8/50064-3>
- [25] Spalart, P.R. (1997) Comments on the Feasibility of LES for Wings, and on a Hybrid RANS/LES Approach. In: *Proceedings of the 1st AFOSR International Conference on DNS/LES*, Greyden Press, 137-147.
- [26] 文科武, 裴炳安, 朱华兴, 等. GB/T 50493-2019. 石油化工可燃气体和有毒气体检测报警设计标准[S]. 北京: 住房和城乡建设部, 2019.